

Evolution of the Energy Matrix and Carbon Intensity in Latin America and the Caribbean (2000–2023): A Structural Comparative Analysis of Major Economies

Abstract— This study analyzes the evolution of the energy matrix and carbon intensity in Latin America and the Caribbean (LAC) during the 2000-2023 period, including a specific sub-analysis of the 2020-2023 interval. The research focuses on nine structurally significant economies: Brazil, Mexico, Argentina, Colombia, Chile, Peru, Ecuador, Bolivia, and Uruguay. By integrating data from the International Energy Agency (IEA) and the World Bank, an analytical framework based on the Kaya Identity and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) decomposition method was applied to quantify the drivers of GHG emissions.

The results reveal a marked regional heterogeneity: while countries such as Uruguay and Brazil exhibit strong decoupling with carbon intensities below 40 CO₂/TJ, economies like Mexico and Argentina maintain a rigid fossil fuel dependency with values exceeding 60 CO₂/TJ. The LMDI analysis demonstrates that economic growth (Activity Effect) remains the primary driver of emissions, often outpacing progress in energy efficiency and energy mix decarbonization.

It is concluded that the region possesses consolidated leadership in renewable electricity but faces an incomplete transformation of its primary energy systems. The study identifies an urgent need to integrate new energy vectors, such as green hydrogen and electromobility, to overcome fossil inertia in hard-to-abate sectors and achieve absolute decoupling in the región.

Keywords-- Decoupling, Kaya Identity, Carbon Intensity, Renewable Energy, CO₂ Emissions.

Evolución de la matriz energética y la intensidad de carbono en América Latina y el Caribe (2000-2023): Un análisis comparativo estructural de las principales economías

Resumen— Este estudio analiza la evolución de la matriz energética y la intensidad de carbono en América Latina y el Caribe (ALC) durante el período 2000-2023, con un subanálisis del intervalo 2020-2023. La investigación se centra en nueve economías estructuralmente significativas: Brasil, México, Argentina, Colombia, Chile, Perú, Ecuador, Bolivia y Uruguay. A través de una integración de datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Banco Mundial, se aplicó un marco analítico basado en la Identidad de Kaya y el método de descomposición de Índice Divisia de Media Logarítmica (LMDI) para cuantificar los motores de las emisiones de GEI.

Los resultados revelan una marcada heterogeneidad regional: mientras que países como Uruguay y Brasil muestran un desacoplamiento fuerte con intensidades de carbono inferiores a los 40 CO₂/TJ, economías como México y Argentina mantienen una dependencia rígida de los fósiles con valores superiores a los 60 CO₂/TJ. El análisis LMDI demuestra que el crecimiento económico (Efecto Actividad) sigue siendo el principal impulsor de las emisiones, superando a menudo los avances en eficiencia energética y descarbonización del mix.

Se concluye que la región posee un liderazgo consolidado en electricidad renovable, pero enfrenta una transformación incompleta de sus sistemas energéticos primarios. Se identifica la necesidad urgente de integrar nuevos vectores como el hidrógeno verde y la electromovilidad para romper la inercia fósil en sectores de difícil abatimiento y lograr un desacoplamiento absoluto en la región.

Palabras clave— Desacoplamiento, Identidad de Kaya, Intensidad de Carbono, Energías Renovables, Emisiones de CO₂.

I. INTRODUCCIÓN

Su América Latina y el Caribe (ALC) ocupa una posición singular y, a menudo, paradójica en el debate global sobre la transición energética. Por un lado, la región posee una de las matrices eléctricas más limpias del mundo, cimentada en una vasta base hidroeléctrica que ha servido como motor de desarrollo durante décadas. Por otro lado, persiste una dependencia estructural de los combustibles fósiles en sectores estratégicos como el transporte, la industria pesada y la minería. Esta dualidad configura una trayectoria de transición que no encaja en los modelos tradicionales de las economías de la

OCDE ni en los de los mercados asiáticos emergentes, exigiendo un análisis propio y contextualizado.

Durante el periodo 2000-2023, ALC ha transitado por ciclos económicos volátiles que han alterado significativamente los patrones de demanda energética. Si bien la última década ha sido testigo de una penetración acelerada de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), principalmente eólica y solar, el Suministro Total de Energía Primaria (TES) sigue anclado mayoritariamente en fuentes fósiles. La literatura científica actual suele enfocarse en la capacidad instalada de generación eléctrica; sin embargo, existe una necesidad crítica de evaluar si esta expansión tecnológica se traduce en un desacoplamiento (decoupling) real y sostenido entre el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) y las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

La dinámica reciente (2020-2023) añade una capa de complejidad adicional. La recuperación económica post-pandemia ha puesto a prueba los compromisos climáticos nacionales (NDCs), enfrentando el reto de reactivar los aparatos productivos sin retroceder en los indicadores de intensidad de carbono. En este escenario, emergen nuevos vectores energéticos como soluciones de largo plazo. El Hidrógeno Verde (H2V) se presenta como una oportunidad estratégica para descarbonizar industrias de difícil abatimiento (hard-to-abate), aprovechando el bajo costo marginal de las ERNC en la región. Paralelamente, la electromovilidad surge como el catalizador necesario para romper la rigidez de la demanda de derivados del petróleo en el transporte urbano y de carga.

A pesar de la relevancia de estos temas, los estudios sistemáticos de largo plazo que integren la evolución de la matriz con la intensidad de carbono mediante métodos de descomposición son escasos para la región en su conjunto. Este estudio busca cerrar dicha brecha analizando la evolución energética y las trayectorias de emisiones en las nueve economías más influyentes de ALC (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, México, Perú y Uruguay), las cuales representan el núcleo del consumo y la generación regional.

La contribución original de esta investigación reside en la integración de tres dimensiones analíticas: (i) la descomposición de factores mediante la Identidad de Kaya para identificar los motores de las emisiones, (ii) la transformación del mix eléctrico con una distinción explícita entre hidroelectricidad y ERNC, y (iii) la evaluación del Factor de Desacoplamiento regional. Este enfoque integral permite discernir si ALC se encamina hacia una transformación estructural verde o si los avances actuales son neutralizados por el crecimiento de la actividad económica y la persistencia fósil.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación emplea un enfoque cuantitativo y analítico para evaluar la relación dinámica entre el suministro energético, la actividad económica y las trayectorias de emisiones de carbono. El marco metodológico se fundamenta en la descomposición de factores y el análisis de indicadores de intensidad.

A. Fuentes de Datos y Preprocesamiento

Se construyó una base de datos armonizada para el período 2000-2023 integrando tres fuentes globales:

1) *Suministro Energético*: Se utilizaron los balances de Suministro Total de Energía Primaria (TES) de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), normalizados en Terajulios (TJ).

2) *Indicadores Económicos*: Los datos del Producto Interno Bruto (PIB) se obtuvieron del Banco Mundial bajo el criterio de Paridad de Poder Adquisitivo (PPP) en dólares internacionales constantes, garantizando la comparabilidad regional.

3) *Inventario de Emisiones*: Los datos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se extrajeron de las bases de datos de la IEA, enfocándose en las emisiones derivadas de la combustión de energía.

B. Indicadores de Intensidad y Umbrales de Interpretación

Se definieron dos métricas fundamentales para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas energéticos nacionales mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$EI = E/PBI \quad (1)$$

$$CI = CO_2/E \quad (2)$$

Donde EI representa la Intensidad Energética (expresada en TJ/10⁶ USD) y CI representa la Intensidad de Carbono de la Energía (expresada en tCO₂/TJ). Para la interpretación de la Intensidad de Carbono (CI), se establecieron umbrales de referencia basados en la literatura técnica y la composición química de los combustibles:

- $CI > 80$ Indica una matriz con alta dependencia de combustibles sólidos y pesados (carbón y petróleo).
- $50 < CI < 65$: Corresponde a sistemas con una participación predominante de gas natural (combustible de transición).
- $CI < 40$: Refleja una matriz descarbonizada con alta penetración de energía hidroeléctrica, solar, eólica o biomasa.

C. Análisis de Descomposición (LMDI)

Para discernir las causas subyacentes en la variación de emisiones, se aplicó el método de Índice Divisia de Media Logarítmica (LMDI I). Este método permite descomponer la variación neta de emisiones (ΔC_{total}) en tres efectos conductores:

$$\Delta C_{total} = \Delta C_{act} + \Delta C_{eff} + \Delta C_{int} \quad (3)$$

Donde ΔC_{act} es el efecto del crecimiento económico, ΔC_{eff} es el efecto de la eficiencia tecnológica e intensidad energética, y ΔC_{int} es el efecto de la sustitución de fuentes en la matriz (descarbonización). Se utilizó una función de ponderación logarítmica para asegurar que la descomposición sea perfecta y sin residuos.

D. Índice de Desacoplamiento (Decoupling)

Finalmente, se evaluó la elasticidad entre el desarrollo económico y el impacto ambiental mediante el Factor de Desacoplamiento (D_f):

$$D_f = 1 - \frac{\Delta\%GHG}{\Delta\%GDP} \quad (4)$$

Este índice permite categorizar a los países según su capacidad de separar el crecimiento del PIB de la generación de emisiones, identificando casos de "Desacoplamiento Fuerte" ($D_f > 1$) cuando la economía crece mientras las emisiones decrecen de forma absoluta.

E. Entorno de Procesamiento

Todo el tratamiento de series temporales, la normalización algorítmica y la generación de modelos visuales (incluyendo gráficos de burbujas multidimensionales) se desarrollaron mediante scripts personalizados en el software MATLAB, asegurando la trazabilidad y precisión del análisis computacional.

III. METODOLOGÍA

A. Panorama Regional de la Matriz Energética (2000–2023)

El análisis del Suministro Total de Energía Primaria (TES) en las nueve economías estudiadas revela una trayectoria marcada por la persistencia de los combustibles fósiles, a pesar del crecimiento sostenido de las fuentes renovables. Durante el periodo 2000-2023, la región de América Latina y el Caribe (ALC) ha mantenido una estructura energética donde el

petróleo y el gas natural representan, en promedio, más del 70% del suministro total en países como México y Argentina.

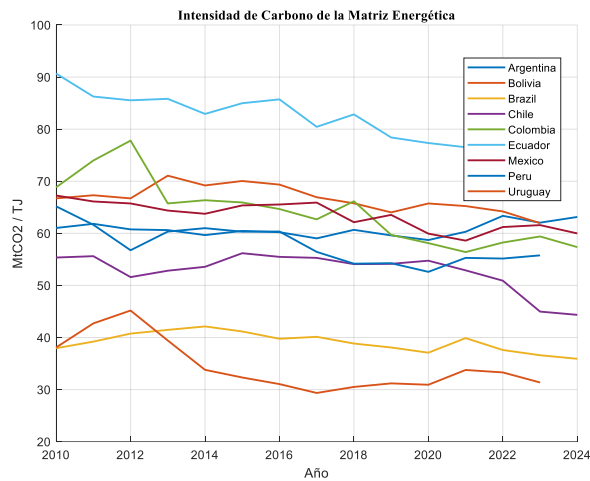


Fig. 1 intensidad de Carbono de la Matriz Energética.

Sin embargo, se observa una transformación significativa en la composición de la oferta renovable. Mientras que la hidroelectricidad continúa siendo la columna vertebral del sistema en Brasil (con un suministro superior a 1.5 millones de TJ en 2023), las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) —solar y eólica— han experimentado una tasa de crecimiento acelerada a partir de 2015. En el caso de Perú, la diversificación ha permitido que el gas natural (proveniente del yacimiento de Camisea) actúe como un combustible de transición crítico, estabilizando la matriz ante las fluctuaciones climáticas que afectan la generación hidrológica. Por otro lado, la biomasa y los biocombustibles mantienen una participación dominante en el sector industrial de Brasil, consolidando una de las matrices menos intensivas en carbono de la región.

B. Análisis de Intensidad de Carbono y Eficiencia Económica
La aplicación de la Identidad de Kaya permitió diagnosticar el estado de la transición energética mediante el indicador de Intensidad de Carbono de la Energía (CI_{Energy}). Al contrastar los resultados con los umbrales de referencia establecidos en la metodología, se identifican tres clústeres de desempeño regional hacia el año 2023.

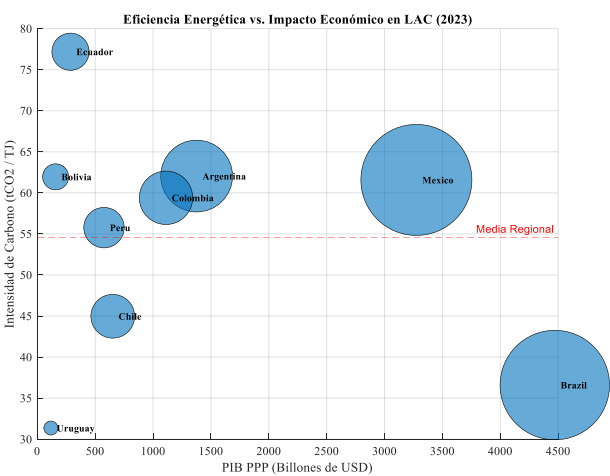


Fig. 2 Eficiencia Energética versus Impacto Económico.

En primer lugar, Uruguay ($31.36 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) y Brasil ($36.59 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) se sitúan por debajo del umbral de $40 \text{ CO}_2/\text{TJ}$, consolidándose como líderes en descarbonización. Su posición en el cuadrante inferior del análisis de burbujas (Fig. 2) demuestra que es posible sustentar una economía de gran escala (en el caso de Brasil, con un PIB superior a los 4.4 billones de USD) manteniendo una baja huella de carbono por unidad energética.

En segundo lugar, Perú ($55.76 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) y Colombia ($59.40 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) se ubican en el rango intermedio, característico de matrices basadas en gas natural. Este resultado es consistente con la política peruana de gasificación, que ha logrado desplazar combustibles más contaminantes como el carbón y el petróleo residual en la industria pesada.

Finalmente, México ($61.57 \text{ CO}_2/\text{TJ}$), Argentina ($62.04 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) y Bolivia ($61.95 \text{ CO}_2/\text{TJ}$) presentan los niveles más altos de intensidad. Para estas naciones, el análisis sugiere una rigidez estructural en la oferta fósil, donde el crecimiento económico sigue fuertemente acoplado al consumo de gas y petróleo, lo que plantea desafíos significativos para el cumplimiento de sus compromisos climáticos a corto plazo.

C. Descomposición de Emisiones mediante el método LMDI
Para identificar los motores subyacentes de las variaciones en las emisiones de GEI, se aplicó la descomposición LMDI en el periodo 2010-2023. Los resultados revelan que el Efecto Actividad (PIB) ha sido el principal impulsor positivo de las emisiones en todas las economías analizadas. En el caso de Perú, el crecimiento económico ejerció una presión al alza constante, la cual fue parcialmente mitigada por el Efecto Eficiencia (Intensidad Energética).

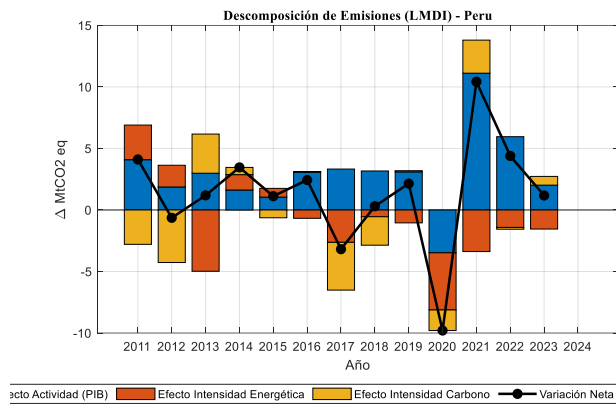


Fig. 3 Descomposición de Emisiones.

Un hallazgo crítico se observa en la comparación entre Brasil y México. En Brasil, el Efecto Intensidad de Carbono mostró valores negativos significativos, lo que indica que la sustitución de fuentes y la expansión de la capacidad eólica y solar lograron contrarrestar el crecimiento del PIB en años específicos. Por el contrario, en México y Argentina, la contribución de la intensidad de carbono a la mitigación fue marginal, sugiriendo que las emisiones netas se mantuvieron al alza debido a una matriz que no logra diversificarse con la rapidez necesaria para compensar la expansión económica. Este análisis confirma que la eficiencia tecnológica (menor consumo de energía por unidad de PIB) ha sido un mitigador más relevante en la región que la propia descarbonización de la oferta energética primaria.

D. Dinámica y Clasificación del Desacoplamiento (Decoupling)

El análisis de la trayectoria temporal entre el crecimiento del PIB y las emisiones de GEI, normalizado al año base 2010, permite clasificar el desempeño ambiental de las naciones bajo el concepto de desacoplamiento. Los resultados del Factor de Desacoplamiento (D_f) calculados en MATLAB muestran una heterogeneidad pronunciada en ALC.

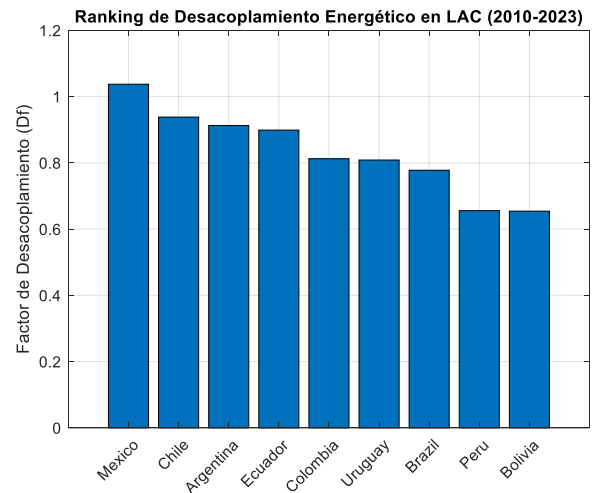


Fig. 4 Ranking de Desacoplamiento Energético en LAC.

Uruguay y Brasil exhiben un Desacoplamiento Fuerte ($D_f > 0.8$), caracterizado por una separación nítida de las curvas: mientras el PIB mantiene una pendiente positiva, las emisiones presentan una tendencia a la estabilización o reducción absoluta. En contraste, Perú presenta un Desacoplamiento Relativo, donde la curva de emisiones crece a una tasa inferior a la del PIB (Índice de Emisiones < Índice de PIB), impulsado principalmente por la penetración del gas natural que ha evitado una trayectoria de emisiones más agresiva.

Finalmente, el ranking regional sitúa a Bolivia y Ecuador en niveles de acoplamiento más rígidos. Para estos países, el factor D_f se mantiene cercano a cero o negativo en ciertos periodos, lo que indica que su desarrollo económico sigue vinculado intrínsecamente al aumento del consumo fósil. Esta comparativa regional resalta que, si bien la región ha avanzado en eficiencia, solo una minoría de países ha logrado romper la dependencia estructural entre la generación de riqueza y el impacto atmosférico, estableciendo una brecha tecnológica clara dentro de la propia región de ALC.

IV. DISCUSIÓN

El análisis multidimensional de las nueve economías de América Latina y el Caribe (ALC) revela una región en una etapa intermedia y heterogénea de su transición energética. A continuación, se discuten los hallazgos bajo tres ejes críticos:

A. La Paradoja de la Matriz Eléctrica vs. la Matriz Primaria

A pesar de que ALC posee una ventaja estructural en la generación eléctrica renovable debido a la dominancia histórica de la hidroelectricidad, los resultados demuestran que esta "limpieza" no se traduce íntegramente en el Suministro Total de Energía Primaria (TES). Países como México y Argentina mantienen intensidades de carbono superiores a los 60 CO_2/TJ , lo que evidencia que la descarbonización del sector eléctrico es insuficiente si no se aborda la dependencia fósil en el transporte

y la industria. Como se observó en el análisis de burbujas, el tamaño de la economía sigue siendo un predictor del impacto total, pero casos como el de Brasil demuestran que es posible escalar el PIB manteniendo una intensidad cercana a los 36 CO₂/TJ mediante una integración profunda de bioenergía y fuentes no convencionales.

B. Desacoplamiento y Eficiencia como Motores de Mitigación

Los resultados del análisis LMDI sugieren que la mejora en la Intensidad Energética (Efecto Eficiencia) ha tenido un impacto más significativo en la contención de emisiones que la propia sustitución de combustibles (Efecto Intensidad). Esto indica que la región está aprendiendo a producir más con menos energía, pero el cambio hacia fuentes más limpias aún no es lo suficientemente veloz para neutralizar el Efecto Actividad (PIB). El desacoplamiento fuerte observado en Uruguay sirve como modelo regional, sugiriendo que la transición requiere una política agresiva de electrificación de la demanda final.

C. Nuevos Vectores: Hidrógeno Verde y Electromovilidad

Para los países situados en el rango intermedio de intensidad (50-65 CO₂/TJ), como Perú y Colombia, la gasificación ha servido como un puente necesario. Sin embargo, para alcanzar los niveles de intensidad de Uruguay (<40 CO₂/TJ), es imperativo integrar nuevos vectores. El Hidrógeno Verde se perfila como la solución para descarbonizar la minería y la industria pesada en el Cono Sur, mientras que la electromovilidad es el único camino viable para reducir la rigidez de la demanda de petróleo en las grandes metrópolis regionales. La transición post-pandemia (2020-2023) muestra señales de aceleración en estos frentes, aunque persiste el riesgo de rebotes fósiles ante crisis de seguridad energética.

IV. CONCLUSIONES

- **Heterogeneidad en la Transición:** La región de ALC presenta trayectorias de descarbonización divergentes. Mientras que naciones como Brasil y Uruguay han logrado un desacoplamiento fuerte, economías como México, Argentina y Bolivia mantienen una correlación rígida entre crecimiento económico y emisiones, situándose en umbrales de intensidad de carbono superiores a los 60 \$tCO₂/TJ\$.

- **Liderazgo Eléctrico Incompleto:** Se concluye que el liderazgo regional en electricidad renovable es una condición necesaria pero insuficiente para la carbono-neutralidad. La persistencia de los combustibles fósiles en el suministro primario total (TES) actúa como un cuello de botella estructural que limita el avance hacia metas climáticas más ambiciosas.

- **Hacia una Nueva Estructura Energética:** El estudio identifica que el futuro de la sostenibilidad en ALC depende de la capacidad de los países para transitar de una "limpieza eléctrica" a una "descarbonización total del sistema". Esto requiere no solo expandir la solar y eólica, sino implementar activamente tecnologías de electromovilidad e hidrógeno verde para desplazar al petróleo en los sectores más difíciles de abatir.

- **Recomendación Metodológica:** La integración de la Identidad de Kaya con el análisis LMDI y factores de desacoplamiento proporciona una hoja de ruta robusta para los tomadores de decisiones, permitiendo identificar si los avances en emisiones son producto de mejoras tecnológicas reales o simplemente de fluctuaciones en la actividad económica.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), "World Energy Balances," IEA, Paris, France, 2023.
- [2] IEA, "Greenhouse Gas Emissions from Energy," IEA, Paris, France, 2023.
- [3] IEA, "World Energy Outlook 2023," IEA, Paris, France, 2023.
- [4] Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), "Latin America and the Caribbean Energy Outlook," Quito, Ecuador, 2023.
- [5] World Bank, "World Development Indicators," Washington, D.C., USA, 2023.
- [6] IPCC, "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change," Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2022.
- [7] Y. Kaya, "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios," presented at the IPCC Energy and Industry Subgroup Response Strategies Working Group, Paris, France, 1990.
- [8] B. W. Ang, "The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide," *Energy Policy*, vol. 33, no. 7, pp. 867–871, May 2005.
- [9] N. Apergis and J. E. Payne, "Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries," *Energy Econ.*, vol. 32, no. 3, pp. 579–584, May 2010.
- [10] P. Ponce, J. S. Proaño, and K. S. Sannas, "Energy transition in Latin America: A review of the current status and future perspectives," *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 110–121, Jun. 2019.
- [11] J. C. Steckel, R. J. Brecha, J. Jakob, and O. Edenhofer, "Drivers for emerging economies' utility sector CO₂ emissions," *Global Environ. Change*, vol. 21, no. 4, pp. 1317–1324, Oct. 2011.
- [12] BP, "Statistical Review of World Energy 2023," 72nd ed., London, UK, 2023.
- [13] Ember, "Global Electricity Review 2023," London, UK, 2023.
- [14] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Capacity Statistics 2023," Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [15] Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), "Energy and Sustainable Development in Latin America and the Caribbean: Challenges and Opportunities," United Nations, Santiago, Chile, 2022.